

女子の下肢屈伸運動における機械的効率

山 本 博 男

The Mechanical Efficiency of the Exercise Consisting of Repetitive Half Knee Bendings for Female Subjects

Hiroh YAMAMOTO

ABSTRACT

In the exercise consisting of repetitive half knee bendings using rebound on both feet without load or with load of 5kg or 10kg at frequency of 44/min, 60/min and 76/min, the mechanical work performed and the oxygen consumption at steady state were measured for two healthy female students.

The higher the frequency of the exercise, the higher became the mechanical efficiency of the exercise. The mechanical efficiency was higher with load than without load. These results suggested that not only the series elastic components of the muscles but also the contractile components of the muscles contributed to the increase of the mechanical efficiency of the exercise.

Furthermore, in this study, the mechanical efficiency of female was higher than that of male previously reported by Yamamoto (1979). As for the ability to utilize elastic energy stored in negative phase, it is suggested that female might be superior to male.

。はじめに

ヒトの筋には、バネのように、あるいはゴムまりのように弾む性質があり、スポーツや日常生活の身体活動において、筋のもつ弾性性質が利用されている。この点に着目し、従来筋の弾性性質に関するメカニズムを明らかにするため、機械的効率の概念を用い、筋の弾性エネルギー再利用についての研究が報告されている。

例えば、機械的効率は仕事量、エネルギー消費量の算出及びその算出法などによって異な

り、Gaesser and Brooks (1975)¹¹⁾ Donovan and Brooks (1977)⁷⁾ 及び金子 (1978)¹⁴⁾ によって、種々の算出法が報告されている。

一方効率の研究として、カエル、ラットなどの摘出筋を用いた効率が、Fenn (1923)⁹⁾ Hill (1963)¹³⁾、Woledge (1968)²¹⁾、Gibbs and Gibson (1972)¹²⁾、Wendt and Gibbs (1973)²⁰⁾ によって報告されている。

さらに、反復下肢運動において Fenn (1930)⁸⁾ は、筋の弾性エネルギー再利用について、否定

的な考え方を示しているが、Hill (1963)¹³⁾は、その有効性を報告している。走運動に関して、Cavagna et al. (1964)⁶⁾が筋の弾性エネルギー再利用説を提唱し、Cavagna (1969)⁵⁾, Lloyd and Zacks (1972)¹⁶⁾, Zacks (1973)²³⁾, Asmussen and B-Peterson (1974)¹⁾, Cavagna and Kaneko (1977)⁴⁾の報告は筋の弾性エネルギー再利用説を支持している。さらに下肢屈伸運動及び跳躍運動に関して、Cavagna (1970)³⁾, Thys et al. (1972)¹⁸⁾ (1975)¹⁹⁾, Asmussen and B-Peterson (1974)¹²⁾ (1979)²²⁾, 山本 (1979)²²⁾, 船渡と石井 (1980)¹⁰⁾によって、機械的効率が求められ、動作が小さく、連続的な運動ほど機械的効率がよく、筋の弾性エネルギーに関する再利用の可能性が増すと報告されている。

しかし、上述の研究は男性を対象としており、女性を対象とした筋の弾性エネルギー再利用に関する報告は皆無に等しい。この点に着目し、筋の弾性エネルギーに関して性差が存在するかどうかは興味深い。

従って、本研究の目的は女性を対象として、反動を用いた下肢の反復屈伸運動において、動作速度を変化させ、その機械的効率を測定し、筋の弾性エネルギー再利用の可能性を、性差の観点から検討することである。

○方 法

1) 被検者 被検者は、金沢大学教育学部体育専攻女子学生2名で、その身体的特徴を、表1に示した。

2) 最大酸素摂取量 (以下 $\dot{V}O_2 \max$ と略記) の測定 自転車エルゴメーターを使用し、50 rpm, 7～10分で疲労困憊に至るような負荷漸増法で行い、呼吸をダグラスバッグ法で集め、ショランダー微量ガス分析器により求めた。

3) 下肢屈伸運動における機械的効率の測定
a) 効率の算出式 本研究では、反復下肢屈伸運動のNet Eを次の式で算出した。

$$\text{Net E} = \dot{W} / \dot{E}t - \dot{E}r$$

ここで \dot{W} : 仕事率 (kcal/min)

$\dot{E}t$: 安静時エネルギー消費量を含む

全エネルギー消費量

(kcal/min)

$\dot{E}r$: 安静時のエネルギー消費量

(kcal/min)

b) \dot{W} (Work rate; 仕事率, kcal/min) の測定

Table 1 Physical characteristics of each subject.

Subj.	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	$\dot{V}O_2$ max. (l/min)(ml/kg·min)	
S.Y.	21.0	162.3	59.1	2.52	42.6
N.K.	20.9	156.0	51.5	2.56	49.7

被検者は、40分間の安静後トレーニングシャツ、トレーニングパンツの服装で反復屈伸運動を行った。その運動は、腰の位置を約11cmから14cm上下させるものであり、テンポは1分間に44回、60回、76回の三種類であった。又、負荷として、0 kg, 5 kg, 10 kgのおもりを腰に取り付け、各テンポについてメトロノームに合わせ7分間運動を行った。又、運動中、被検者の腰にヒモをとりつけ腰の上下動を垂直方向のヒモの動きとしてとらえ、運動開始後5～6分、6～7分の間、ポテンシオメーターを用いてレクタグラフにより記録した。仕事量(W)は、1 kgm当たり約0.002343 kcalに相当するので、 \dot{W} (kcal/min) は、次の式より求めた。

$$\dot{W} = mg \cdot \bar{h} \cdot n \cdot 0.002343 \cdot \frac{1}{2}$$

ここで mg : 被検者の体重+負荷 (kg)

\bar{h} : 垂直方向の腰の平均変位 (m)

n : 2分間に行った脚の伸展回数とする。

c) \dot{E} (Energy cost; エネルギー消費量, kcal/min) の測定 安静時のエネルギー消費量に関しては、30分間の椅座安静時の後、ガスマスク、蛇管、三方活栓を通して、10分間呼吸ガスをダグラスバッグ法により採気し、ショランダー微量ガス分析器により分析した。また、運動中のエネルギー消費量に関しては、運動開始後5～6分、6～7分の間、安静時と同様の方法で呼吸ガスを採気し、分析した。

この結果得た酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$, l/min) に, O_2 1 l のエネルギー当量 を乗じて E (kcal/min) を求めた。本研究では, O_2 1 l 当たり 5.05kcal とした。

なお, 本研究における運動強度は, 18—21% $\dot{V}O_2$ max であった。

。結 果

表 2 に各被検者におけるテンポ及び負荷の変化に伴う機械的仕事量, エネルギー消費量及び機械的効率を示し, 図 1, 図 2 に各被検者におけるテンポ及び負荷の変化に伴う機械的効率を示した。即ち, 被検者 S.Y. において, 無負荷に対し負荷 5 kg では機械的効率はテンポ 44 回/分で 2% 減少し, テンポ 60 回/分で 7%, テンポ 76 回/分で 2% それぞれ増加した。(図 1) また, 無負荷に対し負荷 10 kg では機械的効率はテ

ンポ 44 回/分で 7% 減少し, テンポ 60 回/分で 8%, テンポ 76 回/分で 7% それぞれ増加した。最大効率は, 負荷 10 kg, テンポ 76 回/分の 57.7% であり, 最小効率は, 負荷 10 kg, テンポ 44 kg の 29.5% であった。被検者 N.K. において, 無負荷に対し負荷 5 kg では機械的効率はテンポ 44 回/分で 1.6%, テンポ 60 回/分で 2.7%, テンポ 76 回/分で 2.5% それぞれ増加した。(図 2) また, 無負荷に対し負荷 10 kg では機械的効率はテンポ 44 回/分で 1.0%, テンポ 76 回/分で 1.4% それぞれ減少し, テンポ 60 回/分で 1.7% 増加した。最大効率は, 負荷 5 kg・テンポ 76 回/分の 49.0% であり, 最小効率は, 負荷 10 kg・テンポ 44 回/分の 37.0% であった。

表 3, 図 3 に両被検者におけるテンポの変化に伴う機械的効率の変化を示した。即ち, 両被検者における機械的効率は, テンポ 44 回/分で

Table 2 Mechanical work, energy cost and mechanical efficiency at various frequencies with loads inknee-bending exercise.

Subj.	Frequency (rpm)	Load (kg)	Displacement (cm)		Mechanical Work: \dot{W} (kcal/min)	Energy Cost: \dot{E} (kcal/min)	Mechanical Efficiency (%)
			Mean	S.D.			
S.Y.	44	0	11.9	0.75	0.74	2.04	36.2
		5	12.1	0.59	0.79	2.32	34.0
		10	10.9	0.47	0.76	2.57	29.5
	60	0	11.5	0.73	0.96	2.42	39.6
		5	10.5	0.43	0.94	2.02	46.5
		10	10.9	0.67	1.05	2.22	47.2
	76	0	11.0	0.76	1.18	2.32	50.8
		5	10.5	0.87	1.22	2.32	52.5
		10	10.4	0.82	1.31	2.27	57.7
N.K.	44	0	13.5	0.83	0.72	1.86	38.7
		5	12.5	0.67	0.71	1.76	40.3
		10	11.5	0.71	0.74	1.96	37.7
	60	0	12.5	0.75	0.90	2.32	38.7
		5	11.6	0.53	0.94	2.27	41.4
		10	11.5	0.63	1.00	2.47	40.4
	76	0	11.7	1.11	1.08	2.32	46.5
		5	10.7	0.89	1.09	2.22	49.0
		10	11.2	0.86	1.25	2.77	45.1

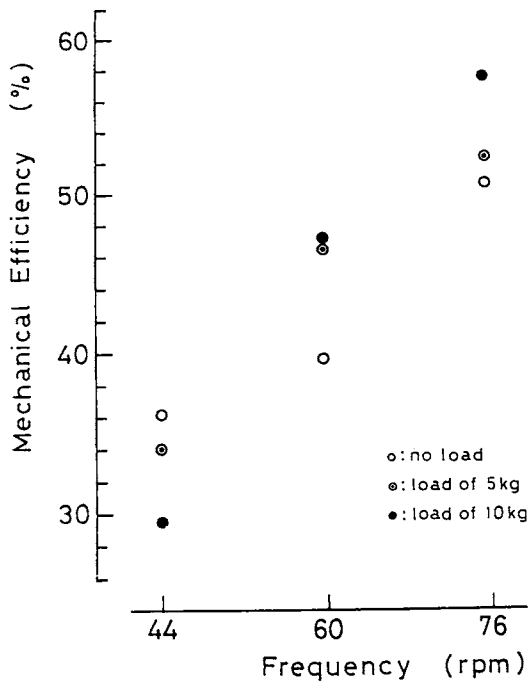


Fig. 1 Changes in mechanical efficiency at various frequencies with loads in knee-bending exercise for subject S. Y.

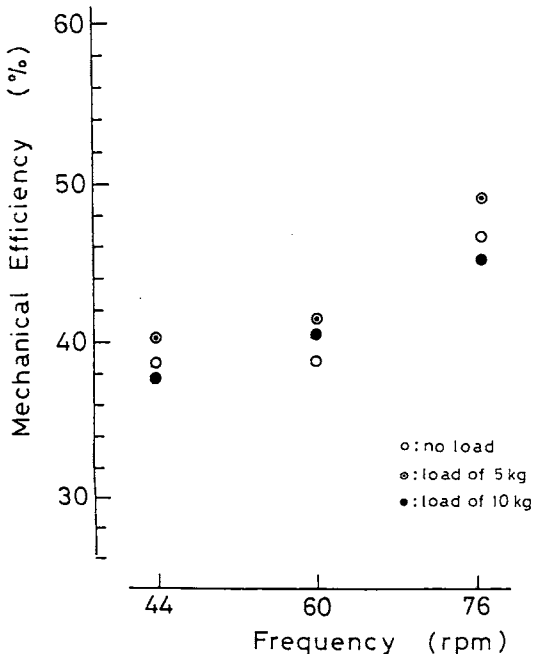


Fig. 2 Changes in mechanical efficiency at various frequencies with loads in knee-bending exercise for subject N. K.

36.0±3.53%, テンポ60回/分で42.3±3.32%, テンポ76回/分で50.2±4.14%であった。

Table 3 Mechanical efficiency at various frequencies in knee-bending exercise.

Frequency (rpm)	Mechanical Efficiency (%)		
	Mean	S.D.	Range
44	36.0	3.53	29.5-40.3
60	42.3	3.32	38.7-47.2
76	50.2	4.14	45.1-57.7

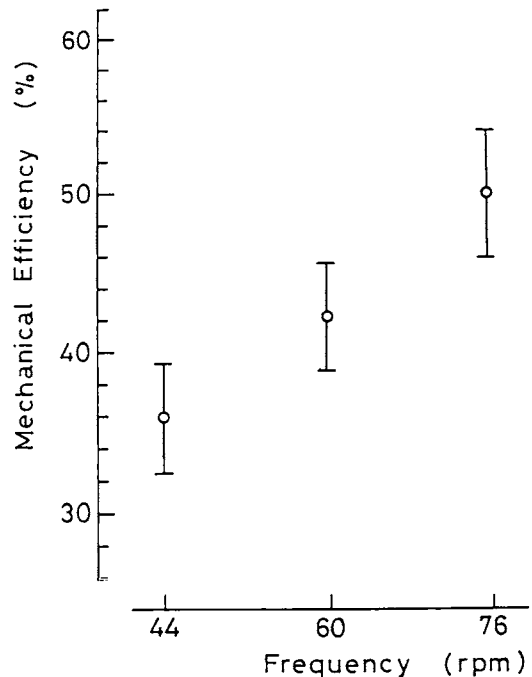


Fig. 3 Changes in mechanical efficiency at various frequencies in knee-bending exercise.

○ 考 察

各被検者におけるテンポの変化から機械的効率の変化についてみると、被検者 S.Y. 及び N. K. においてテンポの増加(44回/分, 60回/分, 76回/分)に伴う機械的効率の増加がみられる。Thys et al. (1972)¹⁸⁾は、重心移動が約50cmの反復屈伸運動において、反動動作を用いた場合(rebound), つまり、運動中主働筋の伸展-収縮が動的に行われる場合と反動動作を用いない場合(no-rebound)とにおいて、機械的効率を

報告しており、reboundで25.8%，no-reboundで18.8%と報告している。なおこの時の動作速度は、20回/分であった。

Asmussen and B-Petersen (1974)¹⁾は、膝関節角度が90°のsemi-squattingにおいて、reboundとno-reboundでの機械的効率を報告しており、機械的効率は、reboundで34.4%，no-reboundで26.1%と報告している。なお、この時の動作速度は、100回/分であった。

従って、脚屈伸運動において、主働筋の伸張一収縮を動的に行った方が、機械的効率は高くまた、Asmussen and B-Petersen (1974)¹⁾の報告におけるreboundでの効率(39.4%)がThys et al. (1972)¹⁸⁾の報告におけるreboundでの効率(25.8%)よりも高いことから、動作速度を増した場合に、筋の直列弾性要素系エネルギー再利用の増大がみられ、機械的効率が高くなると考えられる。

故に、テンポの増加に伴い、本研究の機械的効率が増加したのは妥当であると推察されるが、Thys et al. (1972)¹⁸⁾の報告したreboundでの機械的効率よりも高かったのは、動作速度の違いと共に、脚屈曲の深さの違いによることも考えられる。同じく、Thys et al. (1975)¹⁹⁾は、同様の運動であれば、動作が小さいほど筋弾性再利用の可能性が大きくなると報告している。従って、本研究における腰の移動距離(10.4～13.5cm)が、Thys et al. (1972)¹⁸⁾の研究における重心の移動距離(約50cm)に比べ短かったため、動作が小さくなり、機械的効率が高くなったとも考えられる。

更に、動作速度の変化に伴う機械的効率についての報告は、山本(1979)²²⁾の反復屈伸運動における機械的効率についての報告、船渡ら(1980)¹⁰⁾の跳躍運動における機械的効率についての報告があり、いずれにおいても、テンポ(動作速度)の増加に伴う機械的効率の増加を報告している。

Hill (1963)¹³⁾は、等張力性筋収縮における効率は、収縮時の筋の張力によって変化すると報告しており、テンポの増加に伴う機械的効率の

増加に関する要因として、動作速度が増加した結果、筋の張力が増し、筋の収縮要素の効率が増加したとも考えられ、本研究では各テンポにおいて負荷をかけた実験を行った。

被検者S.Y.において、テンポ44回/分を除き、各テンポで、無負荷、5kg、10kg負荷の順に機械的効率は増加した。山本(1979)²²⁾は、本研究と同様のテンポで、それぞれ負荷をつけて屈伸運動を行った時、負荷の増加に伴う機械的効率の増加を報告しており、本研究の被検者S.Y.における結果と一致する。つまり、本研究の被検者S.Y.において、負荷をつけることにより、筋の発揮される力が大きくなり、その結果、筋の収縮要素の効率が改善されたと考えられる。

被検者N.K.において、負荷5kgで無負荷の時より、各テンポで機械的効率が増加したことから、張力の増加に伴う筋の収縮要素の効率が改善されたと考えられるが、負荷10kgの時では、各テンポにおいて無負荷の場合よりは機械的効率は低くなった。Hill (1963)¹³⁾は、等張力性筋収縮の効率は、収縮時の張力によって変化し最大効率は、最大等尺性筋力の50%張力の時であり、その前後の張力では、効率は低くなると報告している。被検者S.Y.においては、負荷が増加するにつれて、至適張力に近づいたが、被検者N.K.においては、負荷5kgと負荷10kgとの間に至適張力があり、負荷10kgでは、筋の収縮要素の効率が低くなり、機械的効率が減少したのかもしれない。

次に、本研究で得られた女子の機械的効率と先に報告された男子における機械的効率の比較を行い、検討する。

本研究の両被検者における各テンポでの機械的効率の平均は、テンポ44回/分で36.0%，テンポ60回/分で42.3%，テンポ76回/分で50.2%であった。山本(1979)²²⁾は、反復下肢屈伸運動において、テンポ44回/分で平均23.1%，テンポ60回/分で27.5%，テンポ76回/分で29.8%の機械的効率を報告している。

山本(1979)²²⁾の報告は、男子を対象とした機

械的効率であり、本研究における女子被検者はかなり高い機械的効率を示した。このことから反復下肢屈伸運動においては男子よりも女子の方が、機械的効率が高いと考えられる。

従って、反動を用いた脚の伸展作業において、男子と女子では、弾性エネルギー再利用能力に違いがあると思われる。

Cavagna et al. (1964)⁶⁾ は、ランニング中の Positive work の $\frac{1}{2}$ は、Negative phase で吸収されたエネルギーによりなされると報告している。Thys et al. (1975)¹⁹⁾ は、足関節を主に用いた下肢の素早い屈伸運動では、Positive work のうち約 $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{2}{3}$ がNegative phase で吸収されたエネルギーによってなされると報告している。

Komi and Bosco (1978)¹⁵⁾ は、垂直跳びにおいて、女子は Negative phase で吸収されたエネルギーの90%を Positive work に利用でき、男子における49—50%の利用よりはるかに高いと報告している。従って、本研究で得た女子の高い機械的効率は、Negative phase で吸収したエネルギーの再利用能力が女子は非常に優れているとも考えられる。Komi and Bosco (1978)¹⁵⁾ は、弾性エネルギー再利用能力の性差については説明不可能と報告しており、本研究においても、この性差については明らかにし難い。しかしながら、Suzuki (1979)¹⁷⁾ が、人体において筋線維の配分の違いにより効率に差異を報告したことを参考に、今後、個人及び男女における筋固有の性質を検討しながら、より厳密な実験方法、測定により弾性エネルギー再利用能力の性差に関する解明が望まれる。

○ 結 論

- 1 女子の下肢屈伸運動における機械的効率は、テンポが速くなるにつれて高くなった。
 - 2 各テンポにおいても、負荷をかけると、無負荷の時よりも機械的効率が高くなった。
- 以上のことから、テンポ間の機械的効率の増

加には、必ずしも筋の弾性要素利用の増大だけでなく、筋の収縮要素の効率の増大が寄与しているとも考えられる。

さらに、

- 3 先に報告された男子における機械的効率よりも、女子における機械的効率はかなり高くなった。

従って、弾性エネルギーの再利用能力は、男子よりも女子の方が優れている可能性がある。

参 考 文 献

- 1 Asmussen, E. and F. Bonde-Petersen: Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscles during exercise. *Acta physiol. scand.* 92:537-545, 1974.
- 2 Asmussen, E. and F. Bonde-Petersen: Storage of elastic energy in skeletal muscle in men. *Acta physiol. scand.* 91:385-392, 1974.
- 3 Cavagna, G. A. : Elastic bounce of the body. *J. Appl. Physiol.* 29(3):279-282, 1970.
- 4 Cavagna, G. A. and M. Kaneko : Mechanical work and efficiency in level walking and running. *J. Physiol.* 268:467-481, 1977.
- 5 Cavagna, G. A. : Travail mécanique dans la marche et la course. *J. Physiol. Paris*, 61:3-42, 1969.
- 6 Cavagna, G. A., F. P. Saibene and R. Margaria. Mechanical work in running. *J. Appl. Physiol.* 19(2):249-256, 1964.
- 7 Donovan, C. M. and G. A. Brooks: Muscular efficiency during steady-rate exercise II. Effects of walking speed and work rate. *J. Appl. Physiol.* 43(3):431-439, 1977.
- 8 Fenn, W. G.: Frictional and kinetic factors in the work of sprint running. *Am. J. Physiol.* 92:583-611, 1930.
- 9 Fenn, W. G. : A quantitative comparison between the energy liberated and the work performed by the isolated sartorius muscle of the frog. *J. Physiol.* 58:175-203, 1923.
- 10 舟渡和男, 石井喜八, 跳躍運動の効率, 体育の科学, 30(5), 335-340, 1980.
- 11 Gaesser, G. A. and G. M. Brooks : Muscular

- efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J. Appl. Physiol.* 38 (6):1132-1139, 1975.
- 12 Gibbs, C. L. and W. R. Gibson: Energy production of rat soleus muscle. *Am. J. Physiol.* 223(4):864-871, 1972.
- 13 Hill, A. V.: The efficiency of mechanical power development during muscular shortening and its relation to load. *Proc. Roy. Soc. B*, 159:319-324, 1963.
- 14 金子公有：筋作業の機械的効率，*体育の科学* 28 (10)：751—758, 1978。
- 15 Komi, P. V. and C. Bosco: Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Med. Sci. Sports*, 10(4):261-265, 1978.
- 16 Lloyd, B. B. and R. M. Zacks: The mechanical efficiency of treadmill running against a horizontal impeding force. 1972.
- 17 Suzuki, Y.: Mechanical efficiency of fast-and slow-twitch muscle fibers in man during cycling. *J. Appl. Physiol.* 47 (2):263-267, 1979.
- 18 Thys, H., T. Faraggiana and R. Margaria: Utilization of muscle elasticity in exercise. *J. Appl. Physiol.* 32(4):491-494, 1972.
- 19 Thys, H., G. C. Cavagna and R. Margaria: The role played by elasticity in an exercise involving movements of small amplitude. *Pfugers Arch.* 354:281-286, 1975.
- 20 Wendt, I. R. and C. L. Gibbs: Energy production of rat extensor digitorum logus muscle. *Am. J. Physiol.* 224:1081-1086, 1973.
- 21 Woledge, R. C.; The energetics of tortoise muscle. *J. Physiol.* 197:685-707, 1968.
- 22 山本博男：下肢屈伸運動の機械的効率，*金沢大学教育学部紀要第27号（自然科学編）*：85-88, 1979。
- 23 Zacks, R. M.; The mechanical efficiencies of running and bicycling against a horizontal impeding force. *Int. Z. angew. Physiol.* 31:249-258, 1973.